

## 日常生活における自由歩行評価のための慣性センサを用いた膝関節角度計測に関する研究

著者	海老原 匠
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	86
号	1
ページ	62-63
発行年	2017-08
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00121362">http://hdl.handle.net/10097/00121362</a>

修士学位論文要約（平成29年3月）

# 日常生活における自由歩行評価のための慣性センサを用いた膝関節角度計測に関する研究

海老原 匠

指導教員：渡邊 高志

## A Study on Measurement of Knee Joint Angle Using Inertial Sensors for Evaluation of Free Walking in Daily Living

Takumi EBIHARA

Supervisor: Takashi WATANABE

In our research group, an inertial sensor-based estimation method of lower limb joint angles was developed. In this study, knee joint angle measurement for evaluation of the gait performance during free walking was focused. In order to improve estimation accuracy of the angle, a simple method of calibrating deviation between the coordinate systems of inertial sensors were developed. Estimation accuracy of the knee joint angle by using inertial sensors after the calibration of deviation angle in the horizontal plane was examined with 6 healthy subjects. As a result, estimation accuracies of knee joint angle was improved. Next, in order to improve estimation accuracy in walking including turning movement, Kalman filter was modified based on the method using acceleration vector as the observation. The modified Kalman filter showed better estimation accuracy than the results obtained by the previous Kalman filter. However, calibration of 3 deviation angles of the 3 planes was not so effective. It is expected to study for making clear the difference in using deviation angles.

### 1. はじめに

筋力の低下などを原因とした転倒の予防を目的として、日常的に運動機能の維持や改善をするための運動が必要である。そのためには、実際の生活の中で自由な歩行を計測することが必要になると考える。我々の研究グループでは、無線慣性センサを用いて歩行を評価する方法を開発してきており、先行研究では、直線歩行を対象として、身体部位が矢状面内でのみ運動を行うと仮定し、各部位の矢状面傾斜角度や関節角度を算出する方法を構築してきた<sup>1)2)</sup>。しかしながら、旋回運動を含む自由歩行中の関節角度を算出するためには、計測する信号の3軸成分全てを使用する必要がある。その場合、センサを身体に装着する際の身体運動軸とセンサ座標軸の不一致（装着誤差）を原因として、関節角度の推定に誤差が生じる。そこで本研究では、運動機能障害者や高齢者が行える簡便な静止姿勢を計測することで、装着誤差の校正を行う方法を検討した。最初に、剛体リンクモデルを用いて装着誤差角度の推定精度を検証した。次に、健康被験者の直線歩行、自由歩行の計測を行い、水平面内の誤差角度の校正前後での膝関節角度の計測精度について検討を行った。

### 2. 装着誤差を修正するための校正方法の検討

静止立位時の矢状面、前額面、水平面で基準座標系を定義し、校正する角度をオイラー角表現で算出する。まず、下腿部および大腿部の長軸方向が重力方向と平行になる姿勢でそれぞれ計測を行い、得られた加速度信号から前額面内の校正角度 $\beta$ を算出する。次に、前額面内角度の校正を行い、矢状面内の校正角度 $\alpha$ を算出する。その後、座位で下肢を伸展させる姿勢で計測を行い、前額面内と矢状面内の校正をすることで、水平面内の校正角度 $\gamma$ を算出する。これらの角度から各軸まわりの装着誤差の補正を行う回転行列 $R_y(\beta)$ ,  $R_x(\alpha)$ ,  $R_z(\gamma)$ を算出し、歩行計測で得られた信号 $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ に適用することで、装着誤差が補正された歩行計測信号 $\mathbf{u}''' = (u'''_x, u'''_y, u'''_z)$ は次式のように表される。

$$\begin{pmatrix} u'''_x \\ u'''_y \\ u'''_z \end{pmatrix} = R_z(\gamma)R_x(\alpha)R_y(\beta) \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

上述の方法に関して、校正のための静止姿勢の計測により得られる装着誤差角度の推定精度について、剛体リンクモデルを用いて検討を行った。その結果、水平面内の校正角度は良好な精度で推定が可能であったが、矢状面内の校正角度

はセンサの装着状態により推定誤差が大きくなることもあり、3つの面を校正すると適切な校正にならない可能性が考えられた。そこで、水平面内のみの校正の効果を検討するために、次式のように、水平面内の回転行列 $R_z(\gamma)$ を歩行計測時の信号 $u$ に適用して、水平面内のみの校正を行った。

$$\begin{pmatrix} u'_x \\ u'_y \\ u'_z \end{pmatrix} = R_z(\gamma) \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $u' = (u'_x, u'_y, u'_z)$ は、水平面内の装着誤差の補正を行った歩行計測信号である。

### 3. 歩行中の膝関節角度の推定に関する検討

6人の健常被験者で直線歩行、旋回歩行、長時間の旋回歩行を無線慣性センサと3次元動作解析装置を用いて計測した。各歩行条件下での校正後の膝関節角度のRMSEを図1に示す。図1に示す通り、校正を行うことで歩行条件によらずRMSEは小さくなった。一方で、旋回運動を多く含む長時間の旋回歩行では、直線歩行と比べて校正によるRMSEの低減率は小さかった。これに関して、膝関節角度の算出に用いる部位の姿勢ベクトルが旋回運動時において計測誤差が増大したことから、カルマンフィルタが水平面内の回転を正しく補正できないことが原因だと考えた。

上記の結果に基づき、観測値を重力加速度とする拡張カルマンフィルタ(EKF)<sup>3)</sup>の実装を行った。フィルタのパラメータ設定は試行錯誤的に行った。EKFを用いた場合の膝関節角度のRMSEを図2に示す。長時間の旋回歩行でのRMSEは、図1に示す従来のカルマンフィルタ(KF)のRMSEと比較して小さいことから、EKFによって旋回運動中も正しく補正が行えたと考えられる。また、図2に示す通り、校正を行うことでRMSEが大きく低減した。次に、膝関節角度の推定精度のばらつきを評価するために、KF、EKFを用いた場合の膝関節角度RMSEの $\pm 2SD$ を算出した結果を表1に示す。これより、校正を行い、EKFを用いた場合に、最もばらつきが小さいことがわかる。本手法では、部位の長軸方向を表すベクトルに関しても良好な精度で算出ができた。

全ての面内での誤差角度の校正を行った場合の関節角度の推定精度の検討を行った結果、校正前と同程度の精度であったことが確認された。この原因については今後の課題である。

### 4. まとめ

本研究では、センサの装着誤差を校正する方法について検討を行い、水平面内の装着誤差を精度良く算出可能であることを確認した。また、

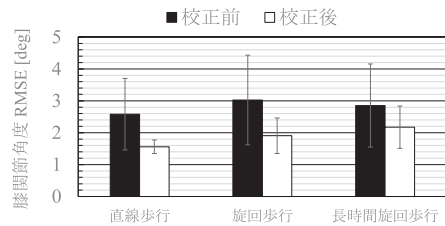


図1 KFを用いた場合のRMSE

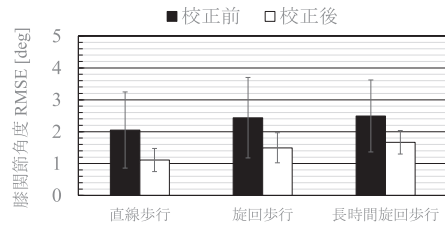


図2 EKFを用いた場合のRMSE

表1 膝関節角度RMSEの $\pm 2SD$

	直線	旋回	長時間
KF_校正前	4.48	5.63	5.22
KF_校正後	0.85	2.22	2.65
EKF_校正前	4.78	5.05	4.51
EKF_校正後	1.45	1.89	1.47

水平面内の校正の実施と膝関節角度算出に用いるカルマンフィルタの変更により、健常被験者での自由歩行中の膝関節角度の推定精度が向上した。今後は、全ての面内の校正を行う方法やセンサ装着位置を検討することが必要だと考えられる。

### 文献

- 1) 齋藤広樹, “無線型慣性センサを用いた下肢角度計測システムに関する研究”, 東北大学大学院医工学研究科修士学位論文, (2011)
- 2) 照山裕太, “慣性センサを用いた下肢角度計測法の計測精度改善に関する研究”, 東北大学大学院医工学研究科修士学位論文, (2014)
- 3) S. Sabatelli, F. Sechi: A sensor fusion algorithm for an integrated angular position estimation with inertial measurement units, 2011 Design, Automation & Test in Europe, 4 Pages (2011)